

전압안정도여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘의 개발에 관한 연구

홍상은**** · 김용하*** · 이범** · 최상규* · 정현성*** · 문혁기*** · 이재걸***
 순천향대학교 정보기술학부**** · 인천대학교 전기공학과*** · 여수대학교 전기공학과** · 안양과학기술대학교 전자통신정보학부*

A Study on Development of Power Transfer Capability Calculation Algorithm
 Considering Voltage Stability Margin.

Hong, S.E.**** · Kim, Y.H.*** · LEE, Buhm** · Choi, S.K.* · Jung, H.S.*** · Moon, H.K.*** · Lee, J.G.***
 Soonchunhyang University**** · University of Incheon*** · Yosu National University** · Anyang Technical College*

Abstract - This paper presents a power transfer capability calculation algorithm Considering Voltage Stability Margin. In this method, voltage stability margin constraints are incorporated into a power transfer capability formulation to guarantee adequate voltage security levels in interconnected Power System. The proposed method is applied to IEEE-24 Reliability Test Systems and the results shows the effectiveness of the method.

1. 서 론

최근, 송전망의 사용에 대한 규제완화(Deregulation)와 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인해 인접지역과의 연계가 용이하게 되었으며, 이로 인해 타 지역과의 수급계약이 활발해 질 수 있게 되었다. 이러한 변화된 전력계통 환경하에서 효율적인 계통운용 및 계획을 위해서는 계통의 수송능력(Power Transfer Capability)을 산정하는 작업이 필수적이다. 그리고 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인하여 전력계통은 더욱 높은 부하상태에서 운전될 가능성이 높아지게 되었다. 전력계통의 부하가 증가하면 전압안정도 여유가 감소하므로 전력계통은 전압붕괴와 같은 전압안정도 문제를 야기시킬 수 있다. 전압안정도여유는 전압붕괴점과 현재 운전점사이의 거리를 의미한다. 전압안정도문제가 비교적 최근에 발생하는 현상일지라도 전력계통의 안전한 운전과 계획을 위하여 전압안정도 문제와 관련된 연구가 지금까지 활발하게 진행되어 왔다. 먼저, 문헌[1]에서는 전압안정도여유를 원하는 값만큼 확보하기 위한 최적 조상설비 설치량을 구할 수 있는 무효전력원 배분계획 알고리즘을 제안하였다. 문헌[2]에서는 전압안정도 여유를 최대화하기 위한 최적 직·병렬 compensation parameter 설정치를 구하는 방법이 제시되었다. 그리고 문헌[3, 4]에서는 최적조류계산에 전압안정도문제를 결합하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 전력계통의 수송능력 산정문제에 대해 전압안정도 여유 제약을 고려할 수 있는 수송능력산정 알고리즘개발에 연구의 목적을 두고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 전압안정도 여유제약식을 정식화한 다음 이를 수송능력산정문제에 반영할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법[5]을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산문제를 선형화한 다음 interior point 방법을 이용한 LP문제로 수송능력 계산을 수행하였다. 또한 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용시켜 본 연구의 타당성을 검증하고 각종 유용한 정보를 도출하였다.

2. 수송능력계산문제

일반적으로 수송능력 계산문제는 주어진 부하 및 계통 조건 하에서 연구지역에서 참여지역으로 또는 참여지역에서 연구지역으로 보낼 수 있는 최대전력수송능력을 계산하는 문제이며 다음과 같이 정식화된다

$$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} & (1) \\ & \text{S.t.} \text{ 조류방정식} \\ & \quad \text{운전제약조건} \\ & \quad \text{제어변수의 상·하한} \end{aligned}$$

단, P_{ij} : 선로 i-j사이를 흐르는 유효전력
 K : 지역(Area)들을 연결하는 연계선의 집합

본 연구에서는 위의 식(1)로 정식화되는 수송능력 문제의 효율적인 계산을 위하여 이와 관련된 수송능력계산 문제를 다음과 같이 정식화하였다. 즉, 계통의 상태변수를 x , 제어변수를 u 라 할 때, 주어진 운전상태 x^0 , u^0 가 조류방정식의 해가 아닐 경우 조류방정식의 계산치 전력과 지정치 전력간에 편차가 발생한다. 이때, 모든 모선에 가상발전기를 배치시킨 다음, i 모선에서의 편차를 $P_M + Q_M$ 라하고, 이 편차를 i 모선의 가상발전기가 담당하도록 한다면, 이때, x^0 와 u^0 는 가상발전기 출력을 포함한 현재 계통의 운전조건을 나타낸다. 이 경우 조류방정식의 해는 가상발전기의 출력 P_M 와 Q_M 이 0으로 되도록 제어변수 u 를 제어함으로써 구해지게 된다. 즉, P_M 와 Q_M 를 줄여 나감에 따라 조류계산의 해가 구해질 수 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 수송능력 계산 문제를 다음과 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Max.} \mu \sum_i (| \Delta P_{M_i} | + | \Delta Q_{M_i} |) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} & (2) \\ & \text{S.t.} \text{ 전력평형식} \\ & \quad \text{부하모선전압크기} \\ & \quad \text{선로의 피상조류} \\ & \quad \text{발전기모선의 무효전력} \\ & \quad \text{제어변수의 상하한} \end{aligned}$$

단, μ : 가상발전기 출력의 가중치
 $\Delta P_{M_i}, \Delta Q_{M_i}$: 가상발전기 출력 변화량

3. 전압안정도여유를 고려한 수송능력 계산문제의 정식화

(1) 전압안정도 여유제약

본 연구에서는 전력계통의 수송능력계산시에 전압안정도문제를 고려하기 위하여 전압안정도 여유제약을 수송능력계산 문제에 반영하였다. 먼저, 전압안정도 여유

VSM은 다음 식(3)과 같이 정의된다.[1]

$$VSM = \frac{\sum_{j \in L} T_j^L - \sum_{j \in L} T_j^N}{\sum_{j \in L} T_j^L} \quad (3)$$

여기서, N : 현재 운전점
L : 전압안정한계점
 T_j^L : 전압안정한계점에서 j모선의 피상부하
 T_j^N : 현재 운전점에서 j모선의 피상부하
 J_L : 부하모선의 집합

식(3)에서 안정한 초기 운전조건에 대하여 VSM은 0과 1사이의 값을 갖으며 전압안정한계점에서는 VSM은 0이다. 그리고 VSM의 음(negative)의 값은 회로망이 지정된 초기의 MVA수요를 공급할 수 없다는 것을 의미한다. 한편, 전력계통의 안전한 운전을 위해서는 현재의 운전점이 전압붕괴점으로부터 안전한 전압안정도여유를 유지하여야 한다. 이때, 전압안정도 여유를 확보하기 위한 전압안정도 여유제약은 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\sum_{j \in L} T_j^L - \sum_{j \in L} T_j^N}{\sum_{j \in L} T_j^L} \geq VSM^{spec} \quad (4)$$

여기서, VSM^{spec} : 최소전압안정도여유 지정치($0 < VSM^{spec} < 1$)

그리고, 전압안정도 한계점에서의 i모선의 피상부하 T_i^L 은 다음 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_i^L = \beta_i \left(\sum_{j \in L} T_j^L - \sum_{j \in L} T_j^N \right) + T_i^N \quad (5)$$

여기서, β_i : 계통 전체부하증가에 대한 부하모선의 부하증가율 위의 식(4)식와 (5)식으로부터 다음 식(6)이 유도된다.

$$T_i^L \geq T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in L} T_j^N \quad (6)$$

지금, i모선에서의 역률 β_i 이 일정하다고 가정하면 위의 식(6)으로 표현되는 전압안정도 여유제약식은 다음 식(7)과 (8)과 같이 유효 및 무효성분으로 나누어 진다.

$$P_i^L \geq \beta_i \left[T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in L} T_j^N \right] = CP_i \quad (7)$$

$$Q_i^L \geq (1 - \beta_i^2)^{\frac{1}{2}} \left[T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in L} T_j^N \right] = CQ_i \quad (8)$$

(2) 수송능력문제에 대한 전압안정도 여유제약식의 고려

앞의 식(2)로 구성되는 수송능력계산문제에 전압안정도 여유제약식을 고려하면 수송능력계산문제는 다음과 같이 정식화된다. 이때, 제약조건식은 현재 운전점과 전압안정한계점에서의 운전제약으로 구분된다.

목적함수

$$\text{Max. } \mu \sum_i (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (9)$$

제약조건식

① 현재 운전점에서의 운전제약

$$\sum_i P_{Gi} - P_L - q = 0 \quad : \text{전력평형식} \quad (10)$$

$$V_{D_i}^{\min} \leq V_{D_i}^N \leq V_{D_i}^{\max} \quad : \text{부하모선 전압크기} \quad (11)$$

$$Q_{G_i}^{\max} \leq Q_{G_i}^N(X^N, U^N) \leq Q_{G_i}^{\min} \quad : \text{발전기모선의 무효전력} \quad (12)$$

$$F_i^N(X^N, U^N) \leq F_i^{\min} \quad : \text{선로피상조류} \quad (13)$$

여기서, P_{G_i} : i번째 발전기의 유효전력출력

P_L : 총계통부하

q : 총계통손실

X^N : 상태변수(부하모선 전압크기, 위상각)

U^N : 제어변수(변압기 탭, 발전기모선 전압크기, 조상설비, 발전기의 유효 전력출력)

② 전압안정도여유와 관련된 운전제약

$$P_i^L(X^L, U^L) \geq CP_i \quad : \text{전압안정도 여유제약조건} \text{의 유효부분} \quad (14)$$

$$Q_i^L(X^L, U^L) \geq CQ_i \quad : \text{전압안정도 여유제약조건} \text{의 무효부분} \quad (15)$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i}^L(X^L, U^L) \leq P_{G_i}^{\max} \quad : \text{전압안정한계점에서 발전기 모선의 유효전력} \quad (16)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i}^L(X^L, U^L) \leq Q_{G_i}^{\max} \quad : \text{전압안정한계점에서 발전기 모선의 무효전력} \quad (17)$$

여기서, X^L : 상태변수(부하모선 전압크기, 위상각)

U^L : 제어변수(변압기 탭, 발전기모선전압크기, 조상설비)

③ 제어변수관련 제약식

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad : \text{변압기 탭} \quad (18)$$

$$V_{G_i}^{\min} \leq V_{G_i} \leq V_{G_i}^{\max} \quad : \text{발전기 모선전압} \quad (19)$$

$$b_{G_i}^{\min} \leq b_{G_i} \leq b_{G_i}^{\max} \quad : \text{모든 Shunt Capacitor가 있는 모선 } i \text{에 대해} \quad (20)$$

$$b_{R_i}^{\min} \leq b_{R_i} \leq b_{R_i}^{\max} \quad : \text{모든 Shunt Reactor가 있는 모선 } i \text{에 대해} \quad (21)$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i}^N \leq P_{G_i}^{\max} \quad : \text{발전기의 유효전력출력} \quad (22)$$

(3) 선형계획문제로의 정식화

본 연구에서는 식(9)~식(22)으로 구성되는 수송능력계산을 LP문제에 해결하였고 이 경우 비선형식의 선형화를 위하여 대규모 계통에서 계산속도와 정확도 면에서 효율성이 우수한 것으로 입증된 Costate 방법을 이용하였다. 그리고 선형계획법을 사용한 최적화 모델에 포함되는 변수의 개수를 줄이기 위해서 가상발전기 출력 및 발전기의 출력을 각각 하나의 변수로 표현하여 계산량을 감소시키도록 하였다[6]. 따라서, 식(9)~식(22)으로 구성되는 수송능력계산문제는 다음 식(23)~(38)과 같이 문제의 크기가 축소된 선형계획문제에 정식화된다.

목적함수

$$\text{Max. } c_{F_1} v + \sum_{i=1}^{NAREFA} c_{F_i} w_i + \sum_{c=NAREFA+2}^{NCV} c_{F_c} \Delta u_c \quad (23)$$

제약조건식

① 현재 운전점에서의 운전제약

전력평형식

$$a_{g_1} v + \sum_{i=1}^{NAREFA} a_{g_i} w_i + \sum_{c=NAREFA+2}^{NCV} a_{g_c} \Delta u_c = -g_1(X^0, U^0) \quad (24)$$

부하모선전압크기

$$\Delta V_{D_i}^{\min} \leq a_{v_i} v + \sum_{i=1}^{NAREFA} a_{v_i} w_i + \sum_{c=NAREFA+2}^{NCV} a_{v_c} \Delta u_c \leq V_{D_i}^{\max} \quad (25)$$

선로의 피상조류

$$a_{T_1} v + \sum_{i=1}^{NAREFA} a_{T_i} w_i + \sum_{c=NAREFA+2}^{NCV} a_{T_c} \Delta u_c \leq \Delta F_1^{\max} \quad (26)$$

발전기모선의 무효전력

$$\Delta Q_{Gi}^{\min} \leq a_{Qv} v + \sum_{c \in NAREA+1}^{NCV} a_{Qc} w_c + \sum_{c \in NAREA+2}^{NCV} a_{Qc} \Delta u_c \leq \Delta Q_{Gi}^{\max} \quad (27)$$

② 전압안정도여유 관련 운전제약

$$\sum_{c \in NAREA+2}^{NCV} a_{VP} \Delta u_c \geq \Delta CP_i \quad (28)$$

$$\sum_{c \in NAREA+2}^{NCV} a_{VQ} \Delta u_c \geq \Delta CQ_i \quad (29)$$

$$\Delta P_{Gi}^{\min} \leq \sum_{c \in NAREA+2}^{NCV} a_{Pc} \Delta u_c \leq \Delta P_{Gi}^{\max} \quad (30)$$

$$\Delta Q_{Gi}^{\min} \leq \sum_{c \in NAREA+2}^{NCV} a_{Qc} \Delta u_c \leq \Delta Q_{Gi}^{\max} \quad (31)$$

③ 제어변수관련 제약식
가상발전기 출력 감소율

$$0.0 \leq v \leq 1.0 \quad (32)$$

i번째지역의 경제급전발전량의 변화량

$$P_{ED,i} - P_{ED,i}^{\min} \leq w_i \leq P_{ED,i}^{\max} - P_{ED,i} \quad (33)$$

발전기모선별 개별급전발전량

$$P_{ID,i} - P_{ID,i}^{\min} \leq \Delta P_{ID,i} \leq P_{ID,i}^{\max} - P_{ID,i} \quad (34)$$

발전기모선 전압크기

$$V_{Gi} - V_{Gi}^{\min} \leq \Delta V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} - V_{Gi} \quad (35)$$

변압기 탭

$$t_l - t_l^{\min} \leq \Delta t_l \leq t_l^{\max} - t_l \quad (36)$$

Shunt Capacitor

$$b_{ci} - b_{ci}^{\min} \leq \Delta b_{ci} \leq b_{ci}^{\max} - b_{ci} \quad (37)$$

Shunt Reactor

$$b_{ri} - b_{ri}^{\min} \leq \Delta b_{ri} \leq b_{ri}^{\max} - b_{ri} \quad (38)$$

NAREA : 지역 수

NCV : 제어변수의 수

c. a. : 선형화식의 각 제어변수에 대한 계수

u_c : v, w를 제외한 제어변수

P_{ED,i} : i번째 지역의 ED의 경제급전 발전량

P_{ID,i} : i번째 모선의 개별급전 발전량

4. 사례 연구

본 연구에서는 제안한 알고리즘을 IEEE RTS-24모형 계통에 적용시켜 각종 유용한 정보를 도출해 내었다. 먼저, 그림1은 주어진 전압안정도 여유지정치로부터 계산된 전압안정도여유의 계산치를 보여준다. 이 그림1로부터 전압안정도 여유제약을 수송능력계산문제에 반영하므로써 계통운영자가 원하는 전압안정도 여유를 확보할 수 있음을 알 수 있다.(수송능력계산문제에 전압안정도 여유제약을 고려하기 전에는 전압안정도 여유가 25.1[%]였다.)

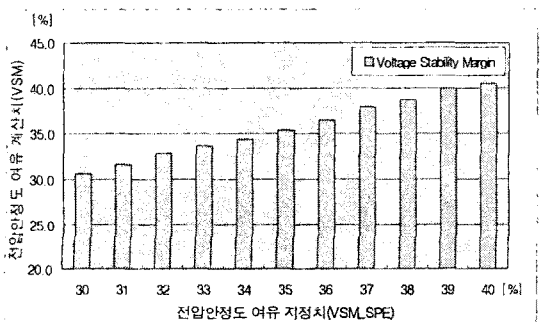


그림 1. 전압안정도여유 지정치와 계산치의 비교

다음에, 그림2는 연계계통의 수송능력계산시 전압안정도 여유가 증가함에 따른 수송능력의 변화를 보여준다. 그림2로부터 일반적으로 전압안정도 여유를 많이 확보할수록 수송능력은 줄어든다는 것을 알 수 있다.

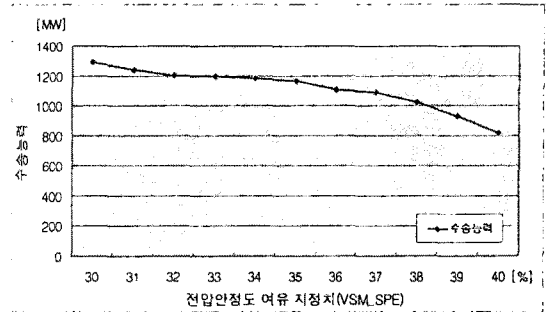


그림 2. 전압안정도 여유증가에 따른 수송능력의 변화

5. 결론

본 연구에서는 연계계통에서의 전압안정도여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 본 연구에서는 전압안정도 여유제약식을 정식화한 다음 이를 수송능력 산정문제에 반영할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산 문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력계산문제를 선형화한 다음 이를 interior point 방법을 이용한 LP문제에 수송능력계산을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 수송능력계산 방법을 통하여 계통운영자가 원하는 전압안정도 여유를 확보하면서 연계 계통으로 보낼 수 있는 수송능력을 효율적으로 계산할 수 있었다. 이후 이에 기초하여 수송능력계산 문제에 상정사고를 고려할 수 있는 알고리즘을 개발하고 실제통에의 적용을 통해 실질적인 각종 정보를 도출하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구
(1999-2-30200-001-3) 지원으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- (1)O.O.Obadina G.J.Berg, "VAR PLANNING FOR POWER SYSTEM SECURITY" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- (2)C.A. Canizares, editor, "Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle node bifurcations", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Application, Vol.45, No.3, March 1998, pp.225-237
- (3)D.Chattopadhyay, D.Gan, "Dispatch optimization incorporating transient and voltage stability constraints", Proceedings of IEEE PES Summer Meeting , Vol.4, 2000, pp.516-521.
- (4)W.Rosehart, C. Canizares, V.Quintana, "Costs of voltage security in electricity markets", Proceedings of IEEE PES Summer Meeting , Vol.4, 2000, pp.2115-2120.
- (5)A.P. Meliopoulos, Power System Control Center-Theory and Operation, EE6520 Notes, Georgia Tech.
- (6)조재한, 남광우, 김용하, 이 범, 최상규 "Monte Carlo Simulation을 이용한 Power Wheeling 영향평가 알고리즘에 관한 연구", KIEE Summer Annual Conference, pp 1111-1113, 7, 1999